

平成22年6月9日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20880020
 研究課題名（和文） 植物生産システムの高度化を目的とする熱・物質輸送プロセスの評価と応用
 研究課題名（英文） Evaluation and application of heat and mass transport process for advancing plant production systems
 研究代表者
 安武 大輔（YASUTAKE DAISUKE）
 高知大学・教育研究部自然科学系・准教授
 研究者番号：90516113

研究成果の概要（和文）：植物生産システムの高度化を目的として、熱・物質輸送プロセスの評価と応用に関する3つの研究課題に取り組んだ。1つ目の課題では、温室内の蒸散要求度が定量的に解析され、その植物水分動態への影響も示された。2つ目の課題では、夏期において生育中果実の高温回避を行うことで、とくに果実外縁部の糖度が高い高品質果実生産が可能であることが示唆された。3つ目の課題では、地中貯水パイプシステムの改良・応用によって、冬の温室の暖房用石油消費量の47%の削減を達成した。

研究成果の概要（英文）：In order to advance highly plant production systems, three study themes in relation to heat and mass transport processes were examined. In the first theme, evaporative demand in the greenhouse was quantitatively analyzed and further its impact on plant water relation was evaluated. In the second theme, temperature control of growing fruit brought increasing Brix in the outer region of the fruits. This suggests that avoidance of excessive high temperature can improve the fruit quality in hot summer season. In the third theme, the underground water pipe system was improved and then the oil use by the heat in the greenhouse was reduced by 47% during the winter season.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,190,000	357,000	1,547,000
2009年度	1,040,000	312,000	1,352,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,230,000	669,000	2,899,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：植物生産システム、高度化、熱輸送、物質輸送、環境調節、省エネルギー、蒸散要求度、局所温度調節

1. 研究開始当初の背景

農産物の需要が世界的規模で増加する一方で、耕地の限られた生産力と面積(露地生産

性の限界)を懸念する観点から、効率的かつ集約的な植物生産システム(すなわち施設園芸)への期待が高まっている(佐瀬, 2008).

とくに、国内においては耕地面積と農業就業者の深刻な減少に加えて、食の安全・安心、国内産のブランド嗜好から、その期待は大きいといえる。しかしながら、国際的な競争力の強化(高効率化:水・肥培管理等の栽培管理性の向上, 高収益化:収穫対象器官の高品質化)および種々の環境問題への対処(暖房用石油消費量の削減による省エネルギー化など)という課題にも直面しており、それらに戦略的に対応した植物生産システムの高度化が切望されている。

一方、植物生産システム内の微気象環境は、外界(外気, 土壌)、石油暖房機、植物体との物理的・生理的プロセスを通じた熱・物質輸送の収支に左右されると同時に、植物生産を直接的に支配する輸送プロセス(根の養水分吸収, および吸収された養水分と葉での合成産物の道管・師管を経由した植物器官への輸送)にも密接に作用する。したがって、上記のような植物生産システムの高度化を図るためには、植物生産システムにおける熱・物質輸送プロセスを定量的に把握し、さらに目的に応じて適切に制御する応用技術が必要である。

2. 研究の目的

植物-環境系における熱・物質輸送プロセスの適切な評価と応用に関する以下3つの課題によって、植物生産システムの高度化を実現する。

(1) 課題Ⅰ: 施設内“蒸散要求度”の確立による栽培管理性の向上

葉の蒸散は、根における水と養分の吸収の駆動力である。そこで、葉の蒸散を引き起こす施設内環境の“蒸散要求度”の評価法を新規に確立し、それを指標にした効率的な水管理・肥培管理を図る。個葉に対する蒸散要求度(Kitano et al., 1990)、野外での蒸散散位などの概念はこれまでに提案されていたが、施設内の蒸散要求度の定量化に関する研究例は見当たらない。そこで、温室内での使用を目的とする高精度かつ小型のパン蒸発計を新規作製し、温室内蒸散要求度を解析する。

(2) 課題Ⅱ: 収穫対象器官の局所温度制御による高品質化

果実などの収穫対象器官の品質(内成分, 形状)には、良質な花の受精とその後の師管と道管を通じた果実への物質(水, 元素, 糖など)輸送が深く関与する。生産現場では、不適切な温度環境(暖候期の高温など)が受精や師管・導管の輸送に影響し、果実品質の低下をしばしば引き起こす。そこで、植物の生理機能に基づいて収穫器官のみを局所的に温度制御することで、最適な糖転流と形態形成による果実の高品質化を図る。

(3) 課題Ⅲ: 地中水パイプ蓄放熱システムの改良・応用による施設暖房の省エネルギー化

園芸施設の省エネルギー暖房技術として、申請者はこれまでに、地中水パイプ蓄放熱システム(日中の太陽熱を地中に埋設した貯水パイプに蓄熱し、その熱を夜間の暖房補助に使用する仕組み)を提案し試作した(宮内・安武, 2007)。しかしながら、このシステムは熱交換能が不足ぎみであった。そこで、簡単な工法によって熱交換能を飛躍的に増加させると共に、ハウス被覆資材の多重化(空気膜ハウス)との技術複合によって、実用的な省エネルギー化を図る。

3. 研究の方法

(1) 課題Ⅰ: 施設内“蒸散要求度”の確立による栽培管理性の向上

温室内での使用を目的とする高精度かつ小型の超音波式パン蒸発計を新規作製した(図1)。これは水で満たされた円筒形の容器(直径 27 cm, 高さ 15 cm)と超音波変位センサ(E4DA, OMRON)から構築される。超音波によって、パン容器内の水位が高精度に計測され、その水位の低下からパン蒸発速度(E_{pan})が評価される。温室内において E_{pan} の観測を始めるとともに、微気象・環境要素(日射量, 正味放射, 気温, 湿度, 風速, 水温など)についても計測し、両者の日変化, 経日変化について解析した。さらに、 E_{pan} と水耕栽培における植物群落の蒸散速度(吸水速度)を比較検討した。



図1 新規作成した超音波式小型パン蒸発計。

(2) 課題Ⅱ: 収穫対象器官の局所温度制御による高品質化

材料植物はスイカとして、実験を2008年の夏期に実施した。地中貯水パイプ蓄放熱システムにおいて、熱交換されて地中貯水パイプから出てくる空気を、配風ダクトを用いて果実へと送風した。温室内の微気象要素(日射, 気温, 湿度など)に加えて、局所的に温

度制御した果実表面（果皮）とその周辺空気の温度についても計測した。また、収穫果実において、生体重、果皮の厚さ、果実中心部と外縁部の糖度の計測を実施した。

(3)課題Ⅲ：地中水パイプ蓄放熱システムの改良・応用による施設暖房の省エネルギー化

地中貯水パイプ蓄放熱システムは、主に熱交換ユニットおよび空気循環ユニットから構成される。熱交換ユニットは、高比熱の水をためた貯水パイプを地温がほぼ一定となる地下2 mに埋設したものである。空気循環ユニットの送風ファンによって、温室内の空気が貯水パイプへと送られる。すなわち、温室内部と貯水パイプ間において熱が効率よく交換され、日中の貯水パイプへの蓄熱および夜間の温室内部への放熱効果が期待される。冬季のイチゴ栽培時において、夜間の暖房機の石油消費量削減を目的として地中貯水パイプによる蓄放熱の効果を調査した。

4. 研究成果

(1)課題Ⅰ：施設内“蒸散要求度”の確立による栽培管理性の向上

E_{pan} は日射量の変化に2時間ほど遅れて追従する日変化を示し、日射量に大きく依存した。また、日射量がほぼ0となる20時以降も蒸発速度は小さいながらも観察されたが、これは、日中の日射によりパン蒸発計の水温が上昇してそれが夜間まで持続したことによって、蒸発が継続したと推察される。夏季の日射量の多い晴天日でも日蒸発速度が5 mm d⁻¹を越すことは無く、他の研究における野外での観測値と同程度であった。この原因として、温室内の風速は常に0.1 m s⁻¹程度とほぼ無風の状態であったことが考えられる。 E_{pan} と植物蒸散速度の経日変化を比較すると、この両者には強い相関関係がみられた。さらに、トマト植物の蒸散速度 Tr との関係と比較した(図2)。 E_{pan} は1時間毎の評価が可能となり(日変化評価)、気象要素に対する E_{pan} の感度も解明された。さらに、1時間毎の E_{pan} と Tr の間には正の相関がみられた。以上のように、超音波式小型パン蒸発計を新規作製することによって、温室内部においてもパン蒸発速度が高精度に計測され、蒸散要求度の定量解析および植物の蒸散速度の推定に有用であることが示唆された。

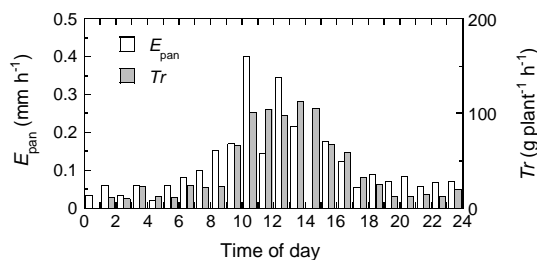


図2 パン蒸発速度 E_{pan} とトマト蒸散速度 Tr の日変化 (2010年1月26日)。

(2)課題Ⅱ：収穫対象器官の局所温度制御による高品質化

温室内の気温は、晴天日の日中には40℃にまで達したのに対して、地中貯水パイプから放出される空気の温度は30℃以下となった(図3)。したがって、局所温度制御を試みた果実の表面温度は、対照区のものに比べて2~3℃程度低くなった。

収穫果実については、果実の生体重および果皮の厚さには処理区間において差異は認められなかった。また、果実糖度は、果実中心部においては処理区間で差異はなかったが、外縁部においては温度処理を実施した果実の方が有意に高くなった。果実の局所温度制御をおこなうことで、高品質果実が生産され得ることが示唆された。

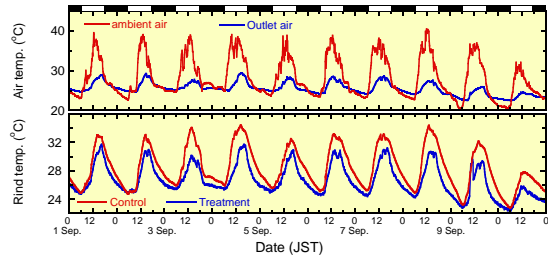


図3 温室内の気温と地中貯水パイプからの空気の温度、および対照区と局所温度制御を適用した果実表面の温度の日変化。

表1. 対照区と局所温度制御を適用した果実の生体重、果皮の厚さ、果実中心部と外縁部の糖度。

	Fresh weight (kg)	Rind thickness (mm)	Brix in central region (%)	Brix in outer region (%)
Treatment	6.4 ± 1.1 ^a	11.7 ± 1.8 ^a	12.2 ± 0.6 ^a	10.4 ± 0.4 ^a
Control	6.3 ± 0.6 ^a	14.3 ± 0.9 ^a	11.5 ± 0.4 ^a	8.8 ± 0.6 ^b

(3)課題Ⅲ：地中水パイプ蓄放熱システムの改良・応用による施設暖房の省エネルギー化

石油暖房機を使用せずとも、外気温(0℃付近)より温室内部気温は7℃程度高く推移した(図4)。また、石油暖房機の夜間設定温度を10℃とした場合には、隣接する対照区ハウスと比較したところ、約47%の石油使用量を削減できた。さらに、夜間設定温度を8℃とした場合には、約62%の石油使用量を削減できた。これらの結果から、地中貯水パイプ蓄放熱システムによる省エネルギー温室暖房の有意性が示唆された。

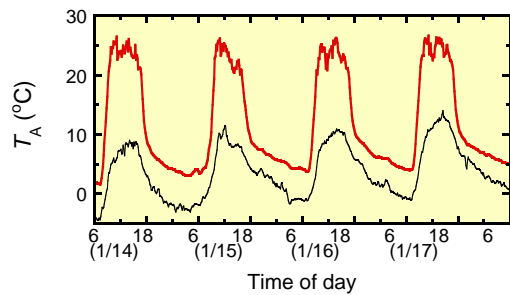


図4 無加温時におけるハウス内外の気温.

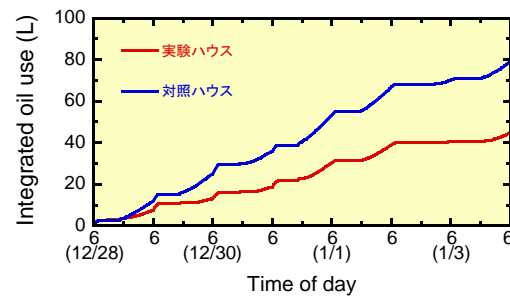


図5 夜間設定温度10°C時における実験ハウスおよび対照ハウスの石油消費量の積算値.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① Yasutake, D., Araki, T., Wang, W., Kobayashi, T., Cho, H., Mori, M. and Kitano, M., Analysis of salts transport affected by root absorption capacity in surface-irrigated fields in the upper Yellow River basin, *Biologia*, 査読有り, 64, 2009, 570-574.
- ② Kitano, M., Urayama, K., Sakata, Y., Sonoda, Y., Ebihara, K., Sago, Y., Yoshikoshi, H., Araki, T., Yasutake, D., Cho, H. and Kobayashi, T., Water and salt movement in soil driven by crop roots: a controlled column study, *Biologia*, 査読有り, 64, 2009, 474-477.
- ③ 日高 功太, 北野 雅治, 和島 孝浩, 荀 亜珊, 佐合 悠貴, 安武 大輔, 荒木 卓哉, 圖師 一文, 松添 直隆, 濃縮海洋深層水の高品質トマト水耕栽培への有効利用 4. 抗酸化機能, アミノ酸代謝および食味に対する短期施用の効果, *Eco-Engineering*, 査読有り, 21, 2009, 59-67.
- ④ 日高 功太, 北野 雅治, 和島 孝浩, 安武 大輔, Mohammad Affan, F. F., 佐合 悠貴, 松岡 孝尚, 石川 勝美, 濃縮海洋深層水の高品質トマト水耕栽培への有効利用 3. 根の養水分吸収および葉の光合成に対する短期施用の効果,

Eco-Engineering, 査読有り, 21, 2009, 27-35.

- ⑤ Yasutake, D., Hidaka, K., Sago, Y., Araki, T., Kitano, M., Kobayashi, T. and Ishikawa, K., Absorption and transport of water and ions in corn and sunflower plants grown under saline conditions, *J. Agr. Meteorol.*, 査読有り, 65, 2009, 19-26.
- ⑥ Hidaka, K., Kitano, M., Sago, Y., Yasutake, D., Miyauchi, K., M. Affan, F. F., Ochi, M. and Imai, S., Energy-saving temperature control of nutrient solution in soil-less culture using an underground water pipe, *Acta Hort.*, 査読有り, 797, 2009, 185-191.
- ⑦ 安武 大輔, 宮内 樹代史, 北野 雅治, 山根 信三, 山本 由徳, 渡部 晃由起, 横山 京介, 平井 真雄, 園芸施設における太陽光・風力を利用したハイブリッド型省エネルギーシステムの試験的構築, 高知大学学術研究報告書, 査読無し, 57巻, 2009, 56-64.

[学会発表] (計10件)

- ① Yasutake, D., Ishikawa, M., Mori, M., Miyauchi, K. and Kitano, M., Development of a supersonic pan-evaporimeter for dynamic analysis of evaporative demand in a greenhouse. International Symposium on Agricultural Meteorology ISAM 2010, 18-19 March, 2010, Nagoya, Aichi.
- ② 安武 大輔, 小林 哲夫, 長 裕幸, 北野 雅治, 王 維真, 田川 堅太, 海老原 健二, 佐合 悠貴, 根圏土壌の塩類含量を表す新規指標の実験的実証, 日本生物環境工学会 2009年福岡大会, 2009年9月5-8日, 福岡県福岡市, 九州大学箱崎キャンパス.
- ③ 佐合 悠貴, 日高 功太, 安武 大輔, 北野 雅治. 酵素反応速度論の応用による根のイオン吸収特性に対する温度効果の評価. 塩類集積土壌における作物の物質吸収機能の評価. 日本生物環境工学会 2009年福岡大会, 2009年福岡大会, 2009年9月5-8日, 福岡県福岡市, 九州大学箱崎キャンパス.
- ④ 宮内 樹代史, 渡部 晃由起, 安武 大輔, 石川 勝美. 園芸施設における石油使用量削減のための新たな加温システム. 日本生物環境工学会 2009年福岡大会, 2009年福岡大会, 2009年9月5-8日, 福岡県福岡市, 九州大学箱崎キャンパス.
- ⑤ 高村 しのぶ, 平井 真雄, 佐合 悠貴, 大渡 勝史, 日高 功太, 安武 大輔, 越智 資泰, 今井 俊治, 脇水 健次,

北野 雅治. 地温不易層の有効利用による省エネルギー温度調節—水耕栽培培養液の温度緩和効果—. 日本生物環境工学会 2009 年福岡大会, 2009 年 9 月 5-8 日, 福岡県福岡市, 九州大学箱崎キャンパス.

- ⑥ Yasutake, D., Yamane, S., Watanabe, A., Miyauchi, K., Kitano, M., Yamamoto, Y., Mori, M. and Ishikawa, K. Temperature control of growing fruit by the underground water pipe system and its effects on watermelon quality. International Symposium on Agricultural Meteorology ISAM 2009, 25-27 March, 2009, Koriyama, Fukushima.
- ⑦ Sago, Y., Kitano, M., Yasutake, D. and Hidaka, K. Characteristics of ion absorption of intact roots can be explained by theory of enzyme kinetics. International Symposium on Agricultural Meteorology ISAM 2009, 25-27 March, 2009, Koriyama, Fukushima.
- ⑧ 安武 大輔, 宮内 樹代史, 山根 信三, 山本 由徳, 北野 雅治, 渡部 晃由起, 石川 勝美. 地中貯水パイプ蓄放熱システムによるハウス内気温の省エネルギー調節—システム改良による蓄放熱能力の向上—. 日本生物環境工学会 2008 年松山大会, 2008 年 9 月 7-11 日, 愛媛県松山市, 愛媛大学農学部キャンパス.
- ⑨ 佐合 悠貴, 日高 功太, 安武 大輔, 北野 雅治. 根群のイオン吸収機能への酵素反応速度論の応用に向けて. 日本生物環境工学会 2008 年松山大会, 2008 年 9 月 7-11 日, 愛媛県松山市, 愛媛大学農学部キャンパス.
- ⑩ 日高 功太, 佐合 悠貴, 安武 大輔, 北野 雅治. 根圏の低温ストレス処理による葉菜の高付加価値化 3. 温度処理条件の検討. 日本生物環境工学会 2008 年松山大会, 2008 年 9 月 7-11 日, 愛媛県松山市, 愛媛大学農学部キャンパス.

[図書] (計 1 件)

- ① 安武 大輔, 施設園芸, 気象利用研究の 20 年, 65-70, 2008 年, SPA&Water 出版社.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :

出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<http://www.cc.kochi-u.ac.jp/~yasutake/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安武 大輔 (YASUTAKE DAISUKE)

高知大学・教育研究部自然科学系・准教授

研究者番号 : 90516113